研究報告
電子航法研究所報告
No.113　2004．8

ELECTRONIC NAVIGATION
RESEARCH INSTITUTE PAPERS
No.113　August　2004

実験用 EVS を用いた融合画像の評価

住　谷　泰　人*，小　瀬　木　滋**，白　川　昌　之***

The evaluation of fusion image based on the experimental enhanced vision system

Yasuto SUMIYA, Shigeru OZEKI, Masayuki SHIRAKAWA

Abstract

EVS（Enhanced Vision System）and SVS（Synthesized Vision System）are known to be effective for pilots to improve situational awareness. An experimental EVS was developed utilizing image fusion techniques for our evaluation. The system was developed and evaluated in two phases. In the first phase, the system obtained the GPS positioning data, attitude data from Gyro sensor and the actual motion picture of scenery on the ground or the ENRI's experimental aircraft to create fusion images. In the second phase, the system integrated the three dimensional（3D）image using the afore-mentioned data and digital map database of the Geographical Survey Institute. The graphical system is used to process the 3D image for expressing the surrounding image from sensor's position. The system carries out a fusion of the 3D image and the actual motion pictures. Since the system is used on the ground, that is, a post-experimental analysis, the flight crews cannot see the fusion images while flying.

Two methods are examined in the simulation of the fusion system for these images. One is a method that the artificial image is overlapped with the actual images of motion picture by a computer to display on its screen. The other is a method that the HUD（Head Up Display）is used to overlap both images and to provide the view for its observer. This paper discusses the difference of two methods as fusion systems. The method with HUD can provide the higher update rate for the animation, for example, with several frames per second or more. However, the accurate adjustment of the observer's position is required.

Several smoothing and prediction methods for measured position and attitude data are also discussed to synchronize the artificial images to actual images. This paper presents the results of the comparison.

The in-house pilot evaluation of the experimental system is carried out for the fusion system with HUD. The evaluation items are scrutinized for the frame rate, the contrast and the color of the 3D image. It also presents the results of the evaluation. It was evaluated that the maximum frame rate of more than 12 is suitable. The best color of the 3D image was a complementary color of the background picture's color.

*衛星技術部　　**電子航法開発部　　***管制システム部

１．はじめに

近年，パイロットの視覚を援助するシステムの１つとして，エンハンスト・ビジョン・システム（EVS：Enhanced Vision System）やシンセサイズド・ビジョン・システム（SVS：Synthesized Vision System）が考えられてきている。これらのシステムは，航空機に搭載した可視光線センサや赤外線センサ等から取得した画像をパイロットに提供できる。また，航空機自身のフライトパラメータや姿勢等の航法情報のグラフィック表示や，コンピュータグラフィックス（CG：Computer Graphics）等の擬似画像の立体的な表示が可能である[1]。さらに，これらの画像から，２つ以上の画像を同時認識できるよう，融合処理した画像（以下，融合画像）も表すことができる[1]。

これらのシステムが航空機に導入されると，パイロットは周囲の状況をより的確に把握できる。特に低視程条件下ではパイロットの負担が軽減され，離着陸時においては，最低運用気象条件の緩和にも役立つことが期待されている。また，陸地や山岳等への衝突を防止する効果も期待できる。

EVS や SVS では，現在，赤外線センサ等の画像を直接，パイロットに提供するシステムが製品化され，軍用機等に導入されている。また，航空機のコックピットにヘッド・アップ・ディスプレイ（HUD：Head Up Display）を設置し，姿勢情報を表示するシステムは，主に軍用機に導入され，昨今，大型航空機にも試験的に導入されてきている。しかし，地図データ等に基づく CG の画像を融合した画像をパイロットへ提供するシステムは，筆者の知る限り未だ開発段階である。電子航法研究所では，こうした融合画像の提供システムにおいて，安全運航に必要となる周辺情報取得処理システムやヘッドアップ状態で集中表示できる情報を表示する技術の開発と，それらの開発に伴う諸問題を明らかにするため，エンハンスト・ビジョン・システムに関する調査・基礎研究を実施してきた。この研究は当所において，平成９年度から平成14年度まで実施され，その一環として，画像取得・融合システムである実験用 EVS を試作，開発した。実験用 EVS の構築と評価により取得できた結果は，今後の EVS や SVS の開発，及び日本国内においてこれらのシステムが航空機に搭載された際の基礎技術資料として期待できる。

本報告では，実験用 EVS を用いた各種実験の概要を紹介し，実験に基づく評価結果について論ずる。第２章では，まず実験用 EVS について記す。実験用 EVS は，データ取得部と画像表示部に分かれている。データ取得部では可視光線と赤外線の２種類の画像や，位置，姿勢情報を取得する。画像表示部では，取得したデータと，画像表示部内にあらかじめ保存してある地図データに基づき，３次元（３D：Three Dimension）の CG を用いた画像（以下，３D画像）を作成する。また，３D画像と機外景観の画像，景観の画像同士を融合できる。これらの融合において，コンピュータ上で融合する場合と，HUD を利用して融合する場合の２通りを構築した。これらを比較し，特徴や相違点等を記す。第３章では，取得データから融合画像を作成する際に試みた平滑化や予測等のデータ加工方法について記す。第４章では実験用 EVS を用いたデータ取得，画像の融合，融合画像を用いたパイロットによる評価の各種実験について記す。最後に，これらの実験結果から得られた今後の課題や実用化の問題点等について記す。

２．試作システム

2.1　試作システムの概要

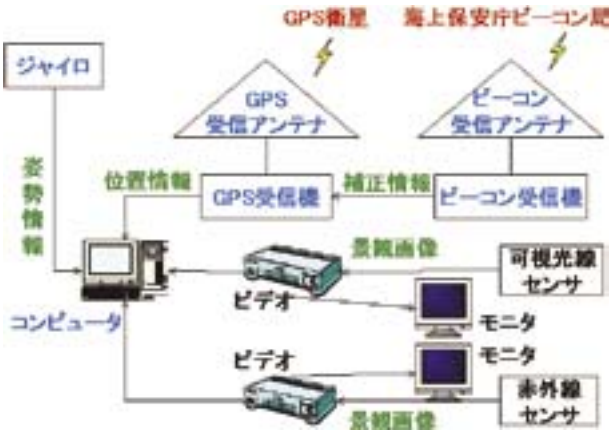
EVS や SVS の実験用システムを試作する際には，自分の航空機（以下，自機）から見た状態の画像が３D画像でパイロットに提供でき，自機周辺の外部景観の画像（以下，景観画像）同士や景観画像と３D画像を融合処理して表示できる機能が必要とされる。

３D画像を，パイロットに正しく提供するためには，自機から見た景観画像に含まれる周辺の表示対象物を，自機から正確な位置関係の画像で表示しなければならない。このため，試作システムには，航法情報を取得した時刻や取得時の自機の位置や姿勢を正確に求める機能が要求される。取得したデータをもとに自機周辺の外部景観の地形画像を表示するためには，飛行した地域の高度情報を含む地図データとともに，３D画像を作成するためのコンピュータが必要である。また，パイロットが機外前方を見ながら，ヘッドアップ状態で情報認識するためには，ハーフミラータイプの HUD やヘッド・マウント・ディスプレイを用いた表示方法が考えられる。その際に表示される画像としては，３D画像や可視領域外のセンサを用いた画像があり，機外の景観画像に融合させてパイロットに提供する状態が考えられる。

以上から，実験用 EVS は，データ取得や３D画像の作成，画像の融合等の問題点等を調査，検討するため，データ取得部と画像表示部に分けて構成した。これを図

※矢印（→）はデータや情報の流れを示す。

図１　考案した試作システム（実験用 EVS）



※矢印（→）はデータや情報の流れを示す。

図２　データ取得部の接続構成例

１に示す。図１のとおり，実験用 EVS はデータ取得後，オフライン処理により融合画像を作成し，画像を表示する。機材の耐空仕様の問題から，画像表示部は地上において使用するため，パイロットはデータ取得と同時に融合画像を見ながらの飛行はできない。

2.2　データ取得部

データ取得部は，自機の位置情報を取得する GPS 機材，姿勢情報を取得するジャイロ，景観画像を取得するセンサ系，それらの情報の保存等に利用するコンピュータやビデオ，モニタ等から構成した。図２に平成14年５月に実施した飛行実験における実験用 EVS データ取得部の接続構成例を，表１に主な機材の仕様を示す。

位置情報を取得するシステムには，DGPS を用いた。データ取得部で使用する DGPS の位置補正情報には，海上保安庁のビーコン局（DGPS 局）から放送されている情報を利用した。この情報をビーコン受信機で受信することにより，GPS 受信機は GPS を用いて取得した自らの位置を測定できている間，補正済みの位置情報を出力できる。ジャイロは航空機の姿勢情報を取得するために使用される。

景観画像を撮影するセンサ系には，可視光線センサと赤外線センサを用いた。可視光線センサは，３D画像や他のセンサ等による別の画像と融合する際，実際の景観画像として使用するための可視画像を取得している。また，霧等の際には可視領域では認識できない場合があるため，可視領域外の補足情報として，温度センサの一種である赤外線センサを使用した。これらのセンサからの取得画像は，各々別々のビデオデッキで録画すると共に，モニタを使用してリアルタイムで見ることができる。コンピュータは，DGPS とジャイロの情報取得に関する設定等を行い，位置情報と姿勢情報を取得，保存できる。また，センサから取得される画像を毎秒３フレーム以上で記録する機能も有している。

2.3　画像表示部

画像表示部は，２つの機能を有している。ひとつは，データ取得位置周辺の地形を３D画像で作成，表示する機能である。このため，データ取得部により取得できた位置，姿勢情報と，国土地理院刊行の地図データ[(2)]を組み合わせる。もうひとつは，３D画像とデータ取得部で取得した２種類のセンサの画像から，２つの異なる画像を選択し，融合画像を表示する機能である。

融合画像を提供するため，複数の異なる画像を融合処理する方法を検討した。複数の画像を融合する際には，融合される複数の画像を各々，明確に認識できる必要がある。しかし，コックピット・ディスプレイ等のディスプレイに投影するよりも，HUD 等ハーフミラー型の機

表１　データ取得部の主な機材の仕様

機材	性能	製品名
可視光線センサ	ResponseBand : Visible ray	Sony XC-333
赤外線センサ	ResponseBand : 3-5 μm	Mitsubishi IR-M700
GPS受信機		NovAtel Communication LTD. 3051R
ビーコン受信機		Communication Systems International Inc.MBX-3
ジャイロ		Crossbow VG400CA
コンピュータ		Fujitsu FMV5233 FA5

材を利用するほうが，パイロットは機外前方を見ながら投影した画像等の情報を認識できる。このため，ディスプレイだけを使用する場合とHUDを使用する場合の相違点を調査できるよう，コンピュータ上で複数の画像を融合するシステムと，HUDを使用して複数の画像を融合するシステムの構築を試みた。

2.3.1　３Ｄ画像の作成と表示方法

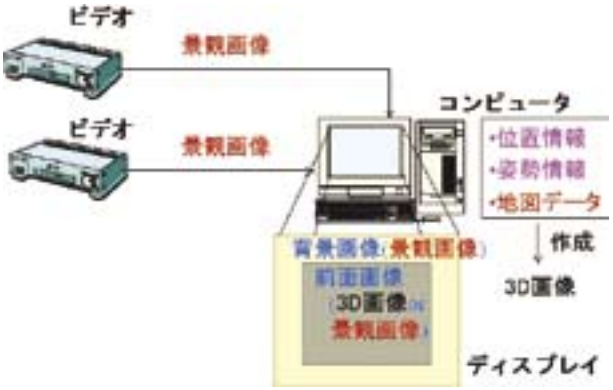
３Ｄ画像の作成のため，データ取得部で取得した自機の位置を中心とする周囲の地形の高度情報を，地図データから取得する。自機の位置の推移と姿勢情報により，針路方向と周囲との位置関係が求められる。自機の姿勢情報と針路方向の周辺地形の高度情報と，コンピュータ内のグラフィックスライブラリにより，自機周辺の地形が３Ｄ画像で表示できる。

３Ｄ画像は当初，地上を表す緑や茶色，空の色等周囲の景観の色を表示する方法との比較等も考えた。しかし表示の際には，CGで描画する対象物と実際の対象物との配色もあわせて検討する必要がある。今回の試作システムでは，融合画像における画像の重なり具合の調査を重点にした。このため，画像を融合するために用いられる３Ｄ画像は，景観画像との誤差を明確に示し，相互補完できる画像として作成することにした。これは，自機から見た背景となる外の景観との位置関係が正確に表示され，かつどちらの画像も適切に認識できるグリッド状の画像である。この作成方法により，景観画像は，３Ｄ画像の配色に惑わされることなく３Ｄ画像のグリッドの線間から認識できる。グリッドの各線分は，東西方向と南北方向に設定した。

作成できる３Ｄ画像の精度は，地図データの標本間隔に基づき変化する。試作システムで使用した地図データは，約50ｍの標本間隔であるため，グリッドの線間は最小で約50ｍとなる。試作システムではコンピュータ負荷を軽減するため，グリッドの間隔を地図データの標本間隔の整数倍で調整できるようにした。コンピュータ負荷と見易さを考慮し，本報告における３Ｄ画像のグリッドの線間は，すべて約100ｍに設定した。

2.3.2　複数の画像の融合方法

図３にコンピュータ上で複数の画像を融合する際のデータの流れを示す。データ取得部で取得した景観画像はビデオで再生され，接続されたコンピュータ上に背景の画像（以下，背景画像）として表示される。背景画像の上に重ね合わせる前面の画像（以下，前面画像）は，



※矢印（→）はデータや情報の流れを示す。

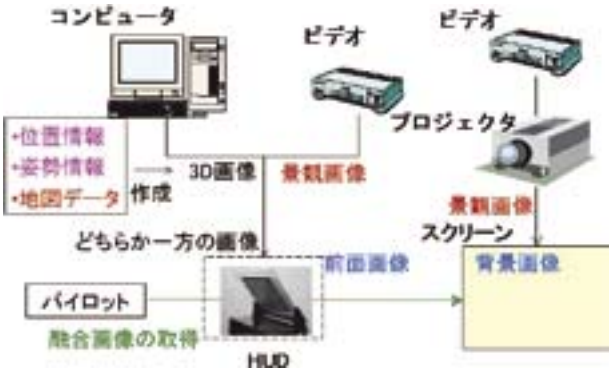
図３　画像表示部（コンピュータ上の複数の画像の融合）

データ取得部で取得した位置情報，姿勢情報，地図データをもとに作成した３Ｄ画像，またはデータ取得部により取得した別の景観画像を表示する。この方法により，背景画像の上に前面画像が重ね合わさった状態で，パイロット役に融合画像を提供できる。

３Ｄ画像をグリッド状で作成する際には，３Ｄ画像のグリッドの間の黒色の面は，透過されない画像として表示されている。よって，コンピュータ上で複数の画像を融合するシステムでは融合の際に，ブレンディングと呼ばれる手法を用いた。この手法は，前面の画像を半透過させ，別々の画像を重ね合わせる方法である。これにより，前面画像に背景画像が隠れる部分を生ずることなく，前面と背景の両方の画像が同時認識できる。

試作システムで使用したHUDは，主に展示用に使用される据置型の製品である[3]。このHUDは，ビデオやコンピュータ等の画像を取り込むことができ，取り込まれた画像は，機材上部に取り付けられたハーフミラーに向けて下部から投影され，ハーフミラー上に表示される。試作システムにおけるパイロット役（以下，パイロット役）は，ハーフミラー上の画像を通して，ハーフミラーの奥の背景となる画像を見ることにより，ハーフミラー上の画像と奥の画像が同時に認識できる。

図４にHUDを用いて複数の画像を融合する際のデータの流れを示す。データ取得部で取得した景観画像はビデオで再生され，プロジェクタを用いてスクリーンに表示される。HUDを使用した場合，スクリーンに表示された画像が背景画像になる。HUD上には，データ取得部で取得した位置情報，姿勢情報，地図データをもとにコンピュータで作成した３Ｄ画像，または他方の景観画像を表示する。HUDは，ハーフミラーであるため，HUDを通してスクリーンを見ることにより，HUD上とスクリーン上の２つの画像を重ね合わせた融合画像を



※矢印（→）はデータや情報の流れを示す。

図４　画像表示部（HUD を用いた複数の画像の融合）

パイロット役に提供できる。

なお，３Ｄ画像と景観画像とを融合させる際は，航空機上に搭載された際に可視光線センサの景観画像が，実際の機外の景観情報を与えることと同様と考えられる。このため，試作システムでは景観画像を背景画像とし，３Ｄ画像を前面画像として表示した。

コンピュータ上で複数の画像を融合する方法では，コンピュータ上に背景となる動画を描画しつつ，３Ｄ画像を表示するためのコンピュータ負荷が大きかった。このため，３Ｄ画像の描画レートは，毎秒１枚であった。HUD を用いて複数の画像を融合する方法では，HUD のハーフミラーがブレンディングの半透過の役割を果たすことができる。HUD を用いた方法では，２つの異なる機材の画像を共にコンピュータ上に蓄えて画像描画する必要がなく，描画する機材が HUD とコンピュータに分割されている。このため，固有のコンピュータに依存せず，コンピュータ上で融合する方法よりも高い画像描画レートが見込める。

表２に画像表示部で用いた主な機材の仕様を示す。

2.4　オフライン処理の影響

データ取得部と画像表示部の間はオフラインであるため，データ取得部の各データ取得時刻に合わせて，画像表示部で画像を融合する必要がある。このため，データ取得時にデジタルビデオカメラを使用し，画像，位置情報，姿勢情報等データ取得部のデータ取得の様子を撮影した。この方法による影響として，デジタルビデオカメラの画像レートに基づく誤差１/30秒と，画像再生時の機械誤差，各種データを保存する際に使用するコンピュータのクロック誤差等の時刻同期誤差が発生する。

３．平滑化補間と予測

位置情報と姿勢情報の取得レートが異なる状態においては，互いの情報の時刻を同期させ，補間値を求める必要がある。また，GPS 単独測位の状況や衛星の位置関係により，位置精度が低くなるため，測定値の誤差を小さくするために，平滑化する方法も必要である。

特に，１秒間に複数枚の画像を描画しなければ，パイロットに，１秒毎の静止画の更新画像を提供することになる。試作システムでは，滑らかな動画をパイロット役に提供できるよう，１秒間に複数の位置情報，姿勢情報を求め，これらの平滑化や予測による誤差の低減手法を試みた。平滑化手法には，移動平均法とスプライン関数を用い，平滑化に基づく補間値を求めた。さらに動画でのリアルタイム処理に対応するため，$\alpha\beta$トラッカを利用して位置を予測した。

3.1　移動平均法による平滑化

移動平均法は，式(1)に示すとおり，時系列の複数項の平均値を求め，平滑化する方法である。

平均値を求める項数により，平滑化の度合が変化する。本報告では３項と５項から求めた移動平均法による平滑化を試みた。

$$x_i = \frac{1}{n} \sum_{j=i-k}^{i+k} a_j \qquad (1)$$

x_i：n 項の移動平均法により求められる平滑値

a_i：ある時刻 t_i $(i \geq k)$ における測定値

$(k=(n-1)/2$ (n が奇数)，$k=n/2$ (n が偶数)

n：平滑値を求めるための項数

表２　画像表示部の主な機材の仕様

機材	製品名	備考
デジタルビデオ	Sony DCR-PC120	図3，4にて使用
コンピュータ	SGI Indigo2	図3，4にて使用
コンピュータ	DELL Dimension8250（Pentium4 2.8GHz，Memory 256MB）	図4にて使用（SGIと置換）
プロジェクタ	EPSON ELP800	図4にて使用
Head Up Display	SHIMAZU SYNKIROH II	図4にて使用

3.2　スプライン関数による平滑化

スプライン関数による平滑化補間は，3次のSchoenbergの平滑化法を用いた自然スプライン関数による平滑化補間処理である。これは，式(2)を最小にするような式(3)のスプライン関数 $s(t)$ を満足する係数 c_i を推定する方法である。

$$I = g\int_a^b \left(s^{(2)}(t)\right)^2 dt + \sum_{i=1}^{n} \nu_i \left(s(t_i) - x_i\right)^2 \qquad (2)$$

$$s(t) = s_0 + s_0^{(1)}\left(t - t_1\right) + \sum_{i=1}^{n} c_i \left(t - t_i\right)_+^3 \qquad (3)$$

g：曲線の滑らかさと測定値との近接度との重み係数
x_i：測定値
s_o：時刻 $t=t_1$ での $s(t)$［初期値］
$s_o^{(1)}$：時刻 $t=t_1$ での微係数［初期変化率］
v_1：各測定値にかかる重み係数
c_1：スプライン係数
$(\,)_+$：切断べき級数

この方法で求められた区間(a, b)における緯度，経度，高度の平滑化補間した値（以下，推定値）は，各々任意の時刻 t の関数になる[4][5]。

求めた推定値は GPS により取得された位置と必ずしも一致せず，速度変動の少ない滑らかな曲線になる。飛行実験時の位置は GPS による位置情報以外に確認する手段がないため，式(2)，(3)の係数を地上走行実験と同様の g ＝100の条件で行い，スプライン関数による推定値が正しい位置を示しているものとした。なお飛行実験では，高度情報もスプライン関数により平滑化した。

3.3　αβトラッカによる位置予測

EVS 等は航空機の衝突防止にも効果が期待されている。このため，実際に航空機衝突防止装置等における追尾手法で用いられている alpha-beta（αβ）トラッカを利用し，予測値を求めてみた。式(4)にαβトラッカの計算式を記す[6][7]。本報告では，(*alpha*, *beta*)＝(0.5, 0.5)で解析を試みた。

$$\begin{aligned} r_{si} &= r_{pi} + alpha \times \left(r_{mi} - r_{pi}\right) \\ {}^*r_{si} &= {}^*r_{si-1} + \frac{beta}{T} \times \left(r_{mi} - r_{pi}\right) \\ r_{pi} &= r_{si-1} + T \times {}^*r_{si-1} \\ 0 &< alpha \\ 0 &< beta < 4 - 2 \times alpha \end{aligned} \qquad (4)$$

alpha：時刻 $t_i(i=1, 2, \ldots, n)$ での位置の利得
beta：時刻 $t_i(i=1, 2, \ldots, n)$ での速度の利得
r_{si}：時刻 $t_i(i=1, 2, \ldots, n)$ での平滑化値
${}^*r_{si}$：時刻 $t_i(i=1, 2, \ldots, n)$ での速度
r_{pi}：時刻 $t_i(i=1, 2, \ldots, n)$ での予測値
r_{mi}：時刻 $t_i(i=1, 2, \ldots, n)$ での測定値
T：時刻 $t_i(i=1, 2, \ldots, n)$ よりも前に測定された時刻 t_{i-1} との間隔

4．実験概要

実験用 EVS を用いて，機材の基礎的な実験を行うと共に，当研究所の所有する測定車や航空機に搭載して，位置等の情報と共に画像を取得するための実験を行った。

4.1　データ取得地上実験

測定車を用いた地上走行実験において，主に DGPS による位置情報の取得状況を調査すると共に，取得データに基づく３Ｄ画像が外部の景観画像の地形を表示できるかを検証した[8][9]。測定車に実験用 EVS データ取得部のうち，ジャイロを除くすべての機材と，画像表示部の一部である地図データを登録したコンピュータを搭載し，３Ｄ画像の表示とデータ取得状況の検証実験を行った。飛行実験時に対応できるよう，見通し距離が長く，高速走行できる条件下で実験するため，中央高速道路の甲府付近で平成11年12月と平成12年８月に走行実験を行った。実験時の走行速度は，走行道路区間における走行車両の最高速度範囲内で定速走行できる時速80km を維持し，東京測地系で位置情報を取得した。図５に実験時の外部の景観とその時にコンピュータで描画した３Ｄ画像を示す。図５の３Ｄ画像の中央部に表示された緑や黄色で表示された山岳は，外部の景観画像の上部にある山並と同様の重なりで表示されている。毎秒１回 DGPS により取得した受信データをもとにし，画角の違いはあるものの，外部の景観画像とほぼ同様の画像を毎秒１フ

外部の景観画像　　３Ｄ画像

図５　地上実験での外部の景観画像と３Ｄ画像の一例

レームの割合で作成できた。また３Ｄ画像作成による時間遅れは明確でないものの，毎秒１フレームの画像で，リアルタイム処理できる可能性があることを確認した。

取得位置情報については，後日の詳細な検証で，山間部等において補正情報を取得できない地域や，データを連続取得できない地域が見られた。また，DGPS で連続取得できた地域において，位置情報を地図上にプロットしたところ，道路外に位置する場合が生じた。このため，第３章に記したスプライン関数による平滑化処理を行い，平滑化処理後の補間された位置情報が，地図上の走行道路と一致できることを確認した。

リアルタイム処理では，過去の位置情報から求めた予測位置に基づき，画像提供することになり，予測位置を求めるにあたって，位置情報に基づく速度ベクトルが必要になる。このため，平滑化処理後の補間位置情報を真の値として，DGPS で連続取得できた位置について，平滑化処理前の速度ベクトルの誤差範囲について検討した。この結果，速度ベクトルは図６のように分布した。最大約±７°のベクトルの揺らぎがあり，平均は−0.0175°，標準偏差は1.83°であった。

また，空港周辺の建物や上空から，データ取得部のセンサを用いて空港面等を撮影し，センサから取得できる画像を調査してみた。この結果，空港周辺の画像において，可視光線センサで取得できない部分を赤外線センサで補助できるが，天候等に左右されることが確認された。例えば雨天時の空港面の灯火や舗装面等においては，必ずしも赤外線センサが有効とならないことが分かった。

さらに，姿勢情報の精度を検討するため，地上においてジャイロを三脚で固定し，姿勢を変化させる実験を行った。この結果，ジャイロによる姿勢情報の変化に，１秒未満のわずかな時間遅れを生じることを確認した[10]。

4.2　データ取得飛行実験

当研究所の実験用航空機（Beechcraft 社製 B99 Airliner）にデータ取得部を搭載し，３回の飛行実験を行った[11][12]。データ取得部のセンサ系（可視光線センサと赤外線センサ）は，実験用航空機の右後部のカメラ穴に据付けた。据付角は，水平面に対し前方下方に25度である。センサ据付アダプタの据付方向を搭載時に変更することにより，センサから取得する画像は，左方向または前方向（進行方向）のどちらかを取得できる。機体の右後部にカメラ穴があるために，表３に示すとおり，画像の変移は揺れ方により異なることが確認された[11]。

実験用航空機と前方向のセンサ据付状態を図７に示す。図７に示すとおり，位置情報を取得する GPS 受信機やビーコン受信機に接続したアンテナは機体上部に位置する。GPS のアンテナは機体に設置済みであるが，ビーコン受信機用アンテナは機体に設置されていないため，既設の HF 用アンテナで代用した。このため，地上実験時に使用したビーコン受信機用アンテナと比較し，覆域が狭いと考える。この影響の一つとして，ビーコン放送局から離れた山岳等の地域で，補正情報を受信できない現象が生じた。センサ操作部，モニタ，コンピュータ等その他の機材は機内右中央部のラックに収納した。

平成13年６月に実施した飛行実験では，仙台空港周辺で，平成14年５月の飛行実験では仙台周辺の山岳上空で薄い霧の画像を取得できた[12][13][14][15]。本報告の画像解析は

表３　据付方向と揺れの関係

揺れや変化	前方向据付	左方向据付
横揺れ	機体の重心（画面の左側）を中心とする回転の変移	上下の変移
縦揺れ	上下の変移	機体の重心（画面の右側）を中心とする回転の変移
方向	左右の変移	

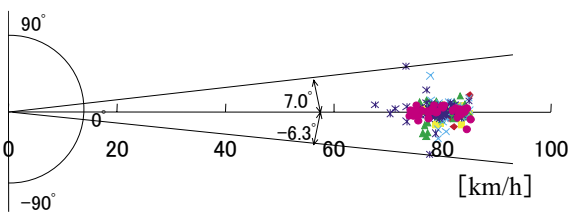


図６　速度ベクトルの分布

図７　実験用航空機とセンサ据付状況

これらの取得画像を中心に実施した。

位置情報は毎秒１回取得した。姿勢情報の取得レートは，時々刻々と変化する姿勢に対応できるため，フルサンプルレートで取得した。平成13年６月の飛行実験ではフルサンプルレートが約150Hz であるが，ジャイロの精度が悪い欠点が発見された。このため，平成14年５月の飛行実験ではこれよりも精度の良いジャイロに変更し，約70Hz のフルサンプルレートで実験を行った。なお，現在の地図情報は世界測地系に変わりつつあるが，以前の実験データとの比較を考え，従来同様，東京測地系で位置情報を受信した。

この結果，仙台空港面及びその周辺での DGPS のデータ取得率が高かったが，山間部等においては取得率が低いことが確認された。

4.3　画像の融合実験

4.3.1　景観画像同士の融合

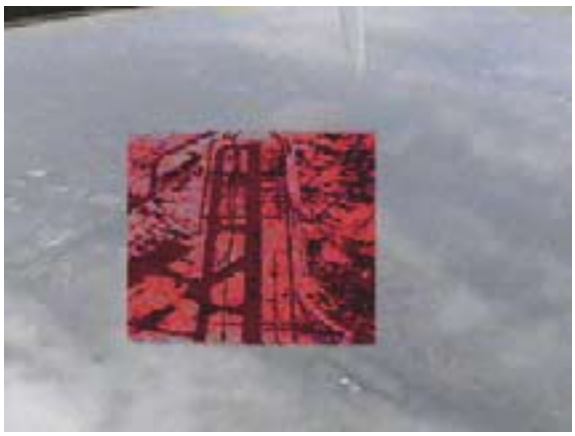
景観画像同士を融合した画像を作成する場合には，取得する各センサのピクセル数や画角が異なることがある。これを解決するため，片方の画像を一旦コンピュータ上でアフィン変換し，背景画像と前面画像の２つの画像における RGB の変化を組み合わせて，融合処理する方法を開発した[13)16)]。

図８に，景観画像同士の融合処理例を示す。図８の(a)と(b)は，各々平成13年６月の飛行実験において仙台空港上空付近での可視光線センサの画像と赤外線センサの画像である。可視光線センサの画像の各ピクセルは RGB（赤，緑，青）の３色から構成されている。赤外線センサの画像は白黒の濃淡であり，RGB の数値は全て同一である。図８の(c)の融合画像は，各センサの画像における RGB の各ピクセル値を，式(5)に従い計算させて作成した画像である。

$$\begin{aligned} &R = \text{可視光線センサの画像の}R + \text{赤外線センサの画像の}R \\ &G = \text{可視光線センサの画像の}G \\ &B = \text{可視光線センサの画像の}B - \text{赤外線センサの画像の}B \end{aligned} \tag{5}$$

(a)　可視光線センサの画像

(b)　赤外線センサの画像



(c)　融合画像

図８　景観画像同士の融合処理例

可視光線センサの画像は薄霧状態で，視界が悪く，滑走路の位置が認識できない。赤外線センサの画像は，実験時の天候が薄霧で，滑走路のアスファルト面の温度が周囲の草地よりも高かったために，滑走路の位置は明瞭に認識できた。濃霧の場合や，草地とアスファルト面がほぼ同一の温度になる場合は，赤外線センサであっても違いを認識できないことがある。この場合には，ミリ波等他のセンサを使用する方法を考える必要がある。

なお，景観画像同士の融合処理では，画角の一致のための変換や計算に要する時間等の影響により，静止画における融合画像は作成できたが，滑らかな動画の融合画像は作成できなかった。

4.3.2　３Ｄ画像と景観画像との融合

第３章で記した補間値や予測値を求める方法により，３Ｄ画像と景観画像とを融合した画像を作成した。図９に，平成14年５月の飛行実験で取得できた薄い霧の状態の画像に基づき作成した３Ｄ画像と景観画像の融合処理例を示す。

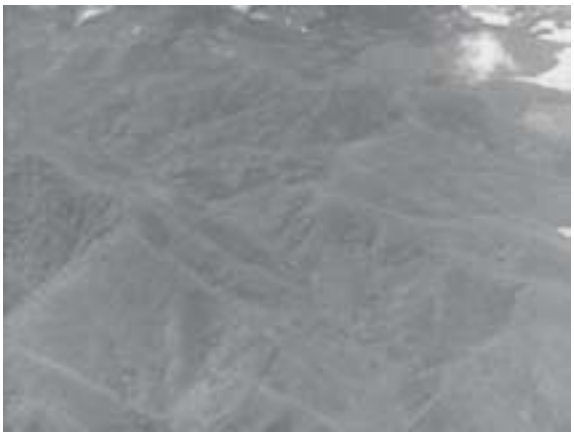
位置，姿勢情報や地図データに基づくシステムでの画像の融合は，画像内に山岳と平地など高低差がある表示対象物が多く，特徴のある形状が含まれれば，融合の一致度を図りやすい。目視では周囲の状況把握が出来る状況であったが，図９の(a)に示すとおり可視光線センサの画像は一面灰色で，画像内の山岳は認識できなかった。可視光線センサの画像をオフライン処理の背景画像としてではなく，加工する等リアルタイム処理で提供画像に使用する場合は，センサの解像度も考慮する必要がある。図９の(b)に，同時に取得した赤外線センサの画像を示す。赤外線センサの取得画像は，可視光線センサの画像と異なり，山岳の起伏を表示している。このとき画像を取得した地点は，地図データと取得した位置情報に基づく自機の緯度，経度，高度から，仙台南部の小さな山岳付近の上空約2800ｍであった。センサの画角，針路方向，地図情報から，地表面の谷部の高度は約100ｍ程度であり，約6400ｍ前方にあると推測される。

この赤外線センサ画像をもとに作成した融合画像を図10に記す。なお，景観画像の起伏が判りやすくなるよう，図10に用いた融合画像の背景である赤外線センサの画像は，コントラストを強調処理した。図10の(a)は測定値，(b)，(c)，(d)は測定値から求めた平滑値，(e)は測定値から求めた予測値を用いて作成した３Ｄ画像と景観画像との融合画像の一例である。図10の融合画像は，すべてHUD を用いた場合の画像表示部で作成した。

作成した融合画像は，画面に映し出される景観画像の位置と飛行位置の位置が近く，高度差が小さければ，グリッドの中に景観画像の起伏が表示される部分がある。今回は約100ｍ間隔でグリッドを設定したが，この値は巡航中に取得する遠方の前方画像の融合には十分であると考える。しかし，離着陸等低高度時の表示や，航空機と地表との距離が近い時には，グリッドの間隔を小さくし，より詳細に表示する必要がある。

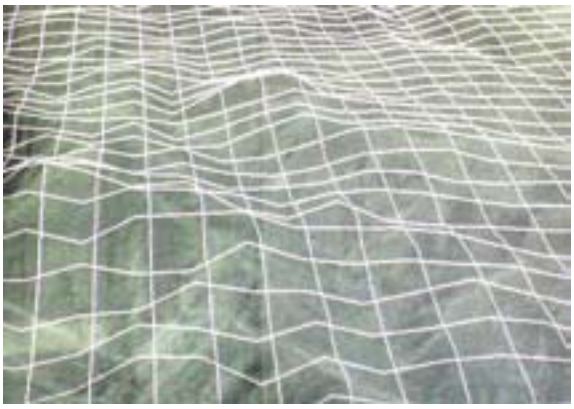
３Ｄ画像を取得した位置が，同一時刻でも測定値，平滑化法，予測値の求め方によって異なるため，３Ｄ画像の山岳等と景観画像の山岳等の輪郭は各々ずれが異なっている。このずれは画像の揺らぎになるため，画像の揺らぎをあらわす指標の一つとして，測定値を基準とした毎秒の平滑値，予測値の差の平均値，標準偏差を求めた[14][15]。これを表４に示す。スプライン関数による平滑化時の場合，平均値は他よりも２桁，標準偏差は１桁以上大きかった。しかし，動画で見る限り，平滑化や予測値の場合に測定値よりも動きが幾分滑らかな程度で，見え方に大き

(a)　可視光線センサの画像

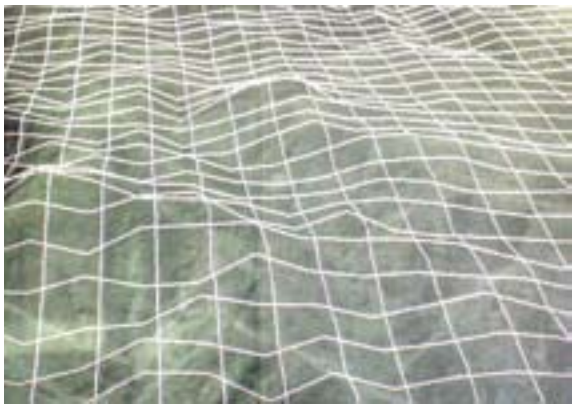


(b)　赤外線センサの画像

図９　航空機からの取得画像



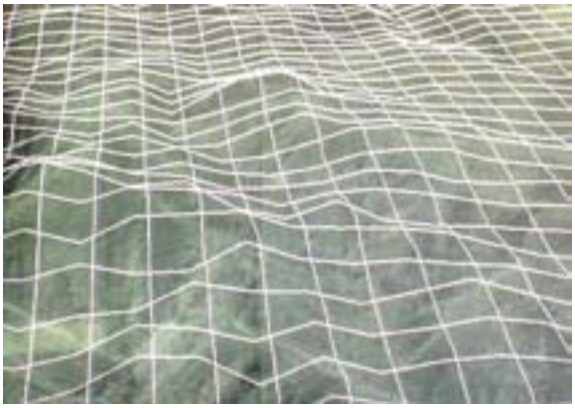
(a)　融合画像（測定値）



(b)　融合画像（移動平均法［n=3］）

(c)　融合画像（移動平均法［n=5］）

(d)　融合画像（スプライン関数）



(e)　融合画像（αβトラッカ）

図10　融合画像

表４　位置の差の平均値と標準偏差

		緯度(°)	経度(°)	高度(m)
移動平均法(n=3)	平均値	1.644780×10^{-6}	8.267007×10^{-7}	4.41497×10^{-4}
	標準偏差	2.057109×10^{-6}	2.066272×10^{-6}	1.44864177×10^{-1}
移動平均法(n=5)	平均値	4.972901×10^{-6}	2.500580×10^{-6}	-1.040956×10^{-3}
	標準偏差	6.064817×10^{-6}	6.091182×10^{-6}	2.23402155×10^{-1}
スプライン法	平均値	-3.415633×10^{-4}	3.413848×10^{-4}	-2.9276689×10^{-2}
	標準偏差	5.403028×10^{-4}	4.079890×10^{-4}	7.18597544×10^{-1}
αβトラッカ	平均値	-4.939729×10^{-6}	-2.469119×10^{-6}	-4.62052×10^{-4}
	標準偏差	6.059986×10^{-6}	6.121016×10^{-6}	2.41467152×10^{-1}

な差は現れなかった。このことから，少なくとも，表４に示す平均値，標準偏差であれば，融合画像の見え方に大きな差は生じないことが分かった。

見え方に大きな差が生じなかった原因には，ジャイロによる補正が不完全であったことが考えられる。地上実験の際に，時間遅れと思われる傾き角のずれが確認されているため，姿勢情報についての平滑化処理や予測処理を行っていないことが，ずれの一因と考える。

4.4　パイロットによる評価

動画が実現できた３Ｄ画像と景観画像との融合画像について，パイロットによる評価を試みた。

4.4.1　評価方法

評価に参加したパイロットは，現役の小型機のパイロット３名である。評価は，パイロットにHUDを用いた複数の画像を融合する方法の画像表示部で融合動画像を示し，アンケート形式の質問表に記述してもらう方法で実施した。質問表には，選択式と記述式の項目が含まれ，パイロットは，融合画像の感想も記述できる。選択式の質問項目には，動画像の描画レート，前面画像の輝度，前面画像の表示色について，各々動画像の見易さ等を回答できる[17]。なお，動画像の描画レートは，４，８，12，15枚/秒の４通り，画像の輝度を４段階，画像の表示色は，白，灰色，赤，橙，緑，青の６色で実施した。

4.4.2　評価結果

表５に，選択式の質問項目の評価結果をまとめる。12枚/秒以上の画像の描画レートであれば概ね見やすいとの回答を得た。画像の輝度は，中間の輝度のバランスが最もよく，前面に現れる３Ｄ画像の輝度は強すぎても，弱すぎても見にくい結果であった。前面画像の表示色は，概ね橙色が見やすいという結果が得られた。この理由として，背景画像が山岳や空であったため，これらの緑や青色と補色関係にある色が見やすかった可能性がある。

被験者であるパイロットからの見やすい画像の描画レート，輝度，表示色についての回答は各々，部分的に異なった。例えば，最も見やすい描画レートは，12枚/秒と15枚/秒の２通りだが，２番目に見やすい描画レートは，８枚/秒と12枚/秒の２通りであり，12枚/秒以上が非常に見やすかったわけではない。８枚/秒と回答したパイロットＢの記述欄や一致度の部分には融合画像の一致度が悪いとのコメントがあった。これは，評価実験に用いた融合画像の手動再生時における制御の誤差による不一致の可能性が高い。また，被験者が３名と少数のため，回答に個人差が表われたと考える。このため，今後の評価の際は，更に多くの被験者で実施することが望ましい。

表５　パイロットの評価結果

		質問項目	パイロットA	パイロットB	パイロットC
可視光線センサ	描画レート	見やすさ（数字は１秒間の画像枚数）	12→15→8→4	12→8→15→4	15→12→8→4
		一致度	部分的に一致	一致していない	部分的に一致
		疲労度	疲れやすい	疲れない	疲れない
	輝度	見やすさ	高→低→最高→最低	高→最高→低→最低	高→最高→低→最低
		一致度	部分的に一致	部分的に一致	その他
		疲労度	疲れない	疲れない	好みの輝度ならば疲れない
	表示色	見やすさ	橙→緑→赤→青→白→灰	赤→橙→緑→白→青→灰	橙→赤→緑→青→灰→白
		一致度	一致	その他	部分的に一致
		疲労度	疲れない	疲れない	疲れない
赤外線センサ	描画レート	見やすさ（数字は１秒間の画像枚数）	12→15→8→4	12→8→15→4	15→12→8→4
		一致度	一致	一致していない	部分的に一致
		疲労度	疲れない	疲れない	疲れない
	輝度	見やすさ	低→高→最高→最低	高→最高→低→最低	高→最高→低→最低
		一致度	部分的に一致	部分的に一致	部分的に一致
		疲労度	疲れない	疲れない	疲れない
	表示色	見やすさ	橙→緑→赤→青→白→灰	橙→緑→白→赤→青→灰	緑→橙→赤→白→青→灰
		一致度	一致	一致	部分的に一致
		疲労度	疲れない	疲れない	回答無し

記述欄には，画像の輝度は調整機能が含まれればよいと言う意見もあった。表示色は灯火色の意味付けを考慮するべきであり，３D画像の線が重なり，見づらいところも見受けられるとの意見も取得できた。よって，山岳や空等の画像を CG で配色した場合にも，同様に見づらい部分を生じることが考えられる。これらの意見は，今後，EVS のシステム構築をする際に検討すべき課題である。

５．まとめ

平成９年度から平成14年度までの６ヵ年にわたり，エンハンスト・ビジョン・システムの調査・基礎研究を行った。

その結果，飛行実験で取得した薄い霧の画像の解析では，可視光線センサでは認識できないが，赤外線センサにより認識できる距離のサンプルが取得できた。また，HUD を用いて融合した場合，コンピュータ単独での融合と比較し，固有のコンピュータに依存せず，汎用のパソコンで動画に匹敵する毎秒十数枚の描画ができた点で優れていることが分かった。しかし，パイロット役が HUD を通してスクリーンをみる際，その視点位置によりスクリーンとの重なりがずれることがある欠点も明らかになった。今回試作した HUD を用いたシステムでは，視点位置が約５cm 上下に移動することで，上下幅の約４％（約20ピクセル）の上下の差が生じた。３D画像作成時には，位置情報に対して移動平均法やスプライン関数を用いた平滑化補間を行い，３D画像を作成するとともに，画像の揺らぎをあらわす指標の１つとして，測定値を基準とした緯度，経度，高度の誤差の平均値，標準偏差を求めることができた。スプライン関数を用いた平滑化補間は他の方法に比べ２桁程度平均値が大きく，標準偏差も１桁大きかったが，見た目に大きな違いはないことが分かった。融合画像を用いて現役のパイロットによる評価実験結果からは，毎秒12フレーム以上の画像描画レートであれば見やすい動画であり，見やすい色や輝度のバランスがあることが分かった。また，表示色についても貴重な意見を取得できた。

一部の姿勢情報が一致しない原因や，可視光線センサと赤外線センサの融合画像を滑らかな動画で提供する方法は未だ解決されていない。また，予測値を求める手法として$\alpha\beta$トラッカ以外の手法との比較等，適切な予測値を求める上での詳細な検討を要する。赤外線センサの使用に際しても，濃霧の場合等必ずしも全天候で可視領域の情報を補足できない。将来的には，ミリ波センサ等他のセンサの活用も必要である。今後の実用化に際しては，地図データの信頼性の問題が生ずる。特に今回用いた地図データには，都市部における建造物等は反映されていないのでその検討が必要である。

試作システムはオフラインではあるが，毎秒12フレーム程度の動画であれば，小型のコンピュータで実現できている。１秒当りの画像枚数は，使用したコンピュータにおける最高速15フレームの８割の画像枚数であり，まだ２割のコンピュータ能力の余地がある。今後の課題であるリアルタイム処理の際には，十分な耐空性能を有するとともに，位置情報や姿勢情報の取得や計算に要する能力が，この余力の範囲内で実現できることが必要である。また，今後の実用化に際し，テレビジョンに匹敵する動画をパイロットに提供するためには，毎秒30〜60フレームの画像描画能力を必要とする。このため，今後さらに高速，高品質な画像処理技術と高性能なコンピュータが要求されていくと考える。

謝辞

データ取得飛行実験の一部は，当研究所電子航法開発部センシング研究グループにおけるヘリコプタによる衝突防止方式の研究との共同実験にて実施しました。共同実験に参加頂いた関係各位，及び航空機の運航等本研究にご協力頂いた関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

［１］Sweet B.T, Tiana C.: “Image processing and fusion for landing guidance”, Enhanced and Synthetic Vision 1996, proceedings of SPIE vol.2736, pp.84-95, Apr.1996

［２］国土地理院：“数値地図50m メッシュ（標高）日本Ⅱ”，㈶日本地図センター，Jul.1997

［３］㈱島津製作所：“DUU-2000展示用 HUD SYNKIROH II 取扱説明書”，DWG No.734-73590 NC, 1996

［４］菅野敬祐，吉村和美，高山文雄：Ｃによるスプライン関数，桜井明（監修），東京電機大学出版局，東京，1993

［５］白川昌之：“自然スプライン関数による航空機の高度プロファイルの推定法”，1994電子情報通信学会論文誌（A）Vol. J77-A No.3, pp.439-446, Mar.1994

［６］RTCA SC-147：Minimum Operational Performance

Standards (MOPS) for Traffic Alert and Collision Avoidance System (TCAS) II Airborne Equipment, RTCA DO-185A, 1997

[7] 小菅義夫, 系正義：“α-βフィルタにおけるサンプルレートと観測精度向上のトレードオフ”, 電子情報通信学会論文集 (B), vol.J85-B, no.8, pp1445-1454, Aug.2002

[8] 住谷泰人, 白川昌之, 小瀬木滋：“EVS 画像融合のための地上実験の解析”, 平成12年度（第32回）電子航法研究所発表会, pp.5-8, Jun.2000

[9] 住谷泰人, M.A.Brown, 白川昌之, 小瀬木滋：“実験用 EVS を用いた地上予備実験の解析”, 2000年電子情報通信学会ソサイエティ大会論文集, no.D-11-45, pp.155, Oct.2000

[10] 住谷泰人, 白川昌之, 小瀬木滋：“ジャイロを使用した EVS 画像融合の基礎実験”, 平成14年度（第２回）電子航法研究所発表会, pp.21-24, Jun.2002

[11] 住谷泰人, 白川昌之, 小瀬木滋：“GPS データに基づく自機周囲の地形と景観の照合”, 平成13年度(第１回）電子航法研究所発表会, pp.15-18, Jun.2001

[12] 住谷泰人, 白川昌之, 小瀬木滋：“GPS とジャイロに基づく３次元画像と景観の融合”, 2002年電子情報通信学会総合大会論文集, no.B-2-35, pp.285, Mar.2002

[13] 白川昌之, 住谷泰人, 小瀬木滋：“赤外線センサ画像と可視光線センサ画像の融合”, 2002年電子情報通信学会総合大会論文集, no.B-2-36, pp.286, Mar.2002

[14] 住谷泰人, 白川昌之, 小瀬木滋：“GPS 位置情報と姿勢情報に基づく３D画像と景観の照合”, 電子情報通信学会技術研究報告, SANE2002-53, pp.37-42, Oct. 2002

[15] Y.Sumiya, M.Shirakawa, S.Ozeki：“A Fusion of Actual Motion Pictures of Scenery and the 3D Image Constructed from GPS and Gyro Data and Map database”, Enhanced and Synthetic Vision 2003, proceedings of SPIE, pp.158-167, Apr.2003

[16] 白川昌之, 住谷泰人, 小瀬木滋：“赤外線カメラ画像と可視光線カメラ画像の融合の一検討”, 電子情報通信学会技術研究報告, IE98-74, pp.1-8, Nov.1998

[17] 住谷泰人, 白川昌之, 小瀬木滋：“EVS 実験における景観と３D-CG の HUD 融合”, 平成15年度（第３回）電子航法研究所発表会, pp.29-32, Jun.2003

(平成15年10月20日受付, 平成16年１月30日再受付)